

Энергетика беспилотных авиационных систем

Power engineering of unmanned aircraft systems

Дмитрий Холкин

Директор АНО «Центр энергетических систем будущего «Энерджинет»

E-mail: dvh@internetofenergy.ru

Dmitry KHOLKIN

Deputy leader (co-head) of the EnergyNet working group, Director of the Center for Future Energy Systems «EnergyNet»

E-mail: dvh@internetofenergy.ru

Игорь Чаусов

Руководитель аналитического направления АНО «Центр энергетических систем будущего «Энерджинет»

E-mail: chi@internetofenergy.ru

Igor CHAUSOV

Head of Analytic Branch of the Center for Future Energy Systems «EnergyNet»

E-mail: chi@internetofenergy.ru

Анна Шуранова

Ведущий аналитик АНО «Центр энергетических систем будущего «Энерджинет», стажёр-исследователь научно-учебной лаборатории экономики изменения климата ФМЭИМП НИУ ВШЭ

E-mail: ashuranova@hse.ru

Anna SHURANOVA

Lead Analyst of the Center for Future Energy Systems «EnergyNet», Research Intern of the Laboratory for Economics of Climate Change at the HSE University

E-mail: ashuranova@hse.ru

Использование солнечных панелей на БВС

Источник: wired.com



Аннотация. Беспилотные воздушные суда (БВС), особенно малых классов, набирают популярность в гражданских сферах применения и формируют быстро растущий мировой рынок. В связи с этим актуализируется вопрос нахождения такого источника энергии для них, который обеспечивал бы максимальное время полёта при минимальном увеличении массы и объёма самого БВС. Выделяются три ключевых типа энергоснабжения БВС будущего, альтернативные распространённым сейчас двигателям: аккумуляторные батареи, фотоэлектрические модули и водородные топливные элементы. Рассматривается использование гибридных источников энергии как основная тенденция развития энергетики БВС. Анализируются два фронтальных технологических направления в этой сфере: увеличение плотности мощности для аккумуляторов и повышение плотности давления в баллонах для хранения водорода. Делается вывод о том, что для России именно эти направления должны стать определяющими в развитии технологий энергоснабжения БВС.

Ключевые слова: беспилотные воздушные суда, аккумуляторные батареи, фотоэлектрические системы, водородные топливные элементы, подзарядка методом подкачки, беспроводная лазерная подзарядка, привязные БВС, водородные баллоны.

Abstract. Unmanned aerial vehicles (UAVs), especially of the smaller classes, are becoming increasingly applicable for civil purposes and are forming a rapidly growing market. This brings forward the problem of finding such a way to fuel them that would ensure maximum flight range without significant increase in UAV weight and size. We discern three such ways which constitute an alternative to present-day engines and will be determinant in supplying UAVs in the future: batteries, photovoltaic systems, and fuel cells. We also consider hybridization as one of the key trends in UAV energy of the future. With regard to the latter, we also analyze two frontier technological tendencies: the enhancement of power density in batteries and of pressure – in hydrogen storage tanks. We conclude that these should become determinant directions of Russia's policy in terms of UAV energy supply.

Keywords: unmanned aerial vehicles, batteries, photovoltaic systems, fuel cells, swapping, wireless power transfer, tethering, hydrogen storage tanks.



Для БВС наиболее распространено использование газотурбинных двигателей, двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей

В настоящее время наметился устойчивый рост спроса на беспилотные авиационные системы и беспилотные воздушные суда (БВС) для специальных, гражданских и коммерческих сфер применения. Актуальный размер этого рынка составляет, по разным оценкам, от консервативных 12,5 млрд долл. до оптимистичных 26,2 млрд долл. в год, а к 2030 г. он может вырасти до 52,3–77,7 млрд долл. в год [1]. Прорыв в сфере БВС возник в результате достижений в области микропроцессоров и искусственного интеллекта, а также в результате появления новых мобильных источников энергии, позволяющих создавать интеллектуальные беспилотники с низкой стоимостью и высокой мобильностью. Постольку поскольку в России в последнее время, в том числе в рамках Национальной технологической инициативы, активно развивается данное направление работ, то рассмотрим энергетические аспекты БВС.

Категория	Масса, кг	Дальность полёта, км	Высота полёта, м	Длительность полёта, ч
Микро-БВС	<5	<10	250	1
Мини-БВС	<20/25/30/150	<10	150/250/300	<2
Тактические БВС	25–1500	10–500+	3000–9000	2–48
Стратегические БВС	2500–5000+	>2000	20000–30000+	24–48+
БВС специального назначения	150–1000+	<1500	50–12000	2–4+

Таблица 1. Категории БВС в зависимости от массы, дальности полёта и иных характеристик

Источник: *Kimon P. Valavanis, George J. Vachtsevanos. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer Dordrecht, 2014. URL: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>*

Сферы применения БВС включают доставку грузов [2], сельское хозяйство [3], мониторинг дорожного движения [4], инфраструктурных объектов, в т. ч. электросетей [5], состояния окружающей среды [6], обеспечения беспроводного покрытия мобильных сетей [7], военные цели и т. д. Кроме того, БВС можно различать по классам и категориям в зависимости от их массы и дальности полёта (таблица 1) [8].

БВС, используемые для доставки на большие расстояния тяжелых грузов, а также в военных целях, имеющие значительную взлётную массу и дальность полёта, скорее можно отнести к малой авиации. Данный сегмент беспилотников имеет уже значительную историю и отработанные решения. Однако, в последнее время стали массово применяться микро- и мини-БВС, энергетические решения для которых еще находятся на стадии становления. Далее мы изучим особенности энергоснабжения таких БВС, частично также затрагивая аппараты специального назначения. Эта тема представляется актуальной в свете значительного потенциала их применения в российских реалиях и необходимости составления чёткого представления о том, какие решения будут релевантны в ближайшие годы с учётом тенденций энергоперехода и развития новейших энергетических технологий.

Двигатели БВС

Для БВС наиболее распространено использование газотурбинных двигателей, двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей.

Газотурбинные двигатели, используемые в силовых установках летательных аппаратов, демонстрируют хорошие характеристики только в диапазоне высокой мощности (более 100 л. с.) и не подходят для применения в малых БВС, поскольку

отличаются низкими показателями экономии топлива и эффективности при высоком уровне шума.

Широкое распространение получили двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и электродвигатели. По сравнению с электродвигателем, ДВС способен обеспечивать большую длительность полёта и дальность полезной нагрузки, благодаря более высокой мощности и топливной экономичности. Однако электродвигатели остаются предпочтительными для малых БВС вследствие наличия таких ключевых характеристик, как:

- низкие тепловые и акустические характеристики (сложнее обнаружить тепловым радаром);
- хорошо развитые электронные системы управления;
- низкая стоимость;
- более высокая надёжность и меньшая взрывоопасность [9].

Военный беспилотник

Источник: *estebande / depositphotos.com*



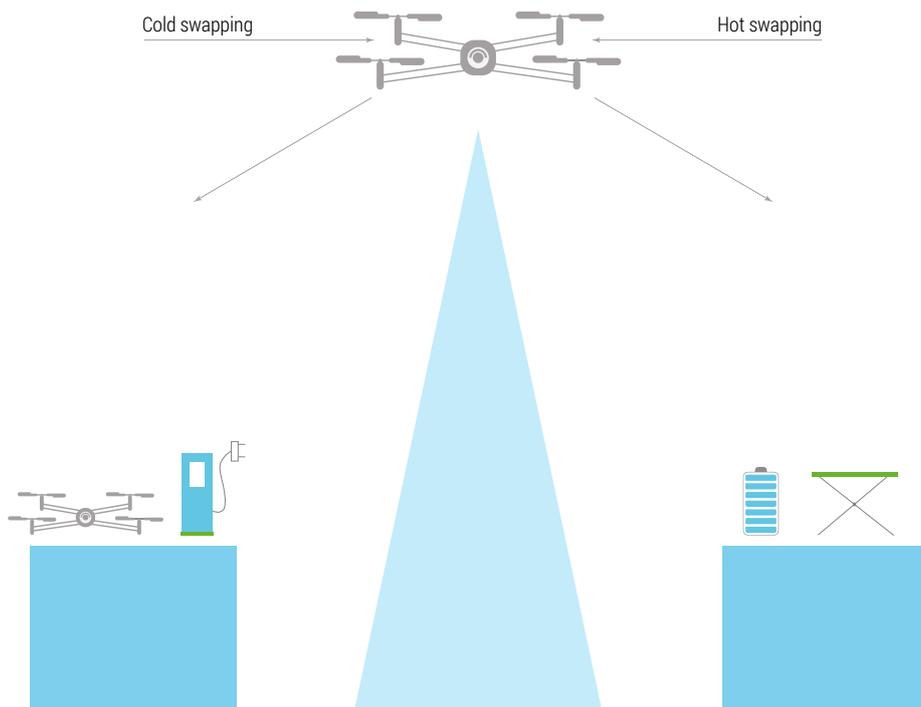


Рис. 1. Подзарядка методом подкачки

Источник: [14]

В настоящее время электродвигатели являются самым распространённым решением для малых БВС, источниками энергии для которых обычно являются электрические аккумуляторы, фотоэлектрические модули, топливные элементы.

Аккумуляторные батареи

Большинство небольших БВС, особенно квадрокоптеров, работают на батарейных системах. Решения на базе аккумуляторов способны закрыть основные потребности гражданского сегмента в плане длительности полёта, стоимости и гибкости. Наибольшее время полёта (до 1,5 ч) обеспечивают литий-полимерные аккумуляторы, которые, к примеру, для микро-беспилотников весят менее 2 кг. Также применяются литий-ионные, никель-кадмиевые, никель-марганцевые, литий-серные, свинцово-кислотные и иные накопители. Эти аккумуляторы уступают литий-полимерным по плотности энергии, экономии массы и другим характеристикам [10].

Недостатками аккумуляторного типа энергоснабжения являются ограничения по накопленному запасу энергии, что значительно сужает время функционирования БВС. Для устранения этой проблемы и обеспечения возможности выполнять длительные миссии используется несколько реше-

ний, связанных с различными способами подзарядки аккумуляторов БВС [11].

Так, подзарядка аккумуляторных БВС методом подкачки может проводиться средствами либо холодной подкачки, либо горячей замены (рис. 1) [12]. Оба этих способа предполагают посадку БВС на наземную зарядную станцию, но при холодной подкачке аккумулятор БВС подключается к зарядке, и сам аппарат остаётся на месте на всю продолжительность этого процесса, а при горячей замене разряженный аккумулятор извлекается из продолжающего работать БВС, и на его место устанавливается полностью заряженный, заранее подготовленный на станции [13].

Наибольшее время полёта (до 1,5 ч) обеспечивают литий-полимерные аккумуляторы весом менее 2 кг. Также применяются литий-ионные, никель-кадмиевые, никель-марганцевые и иные накопители

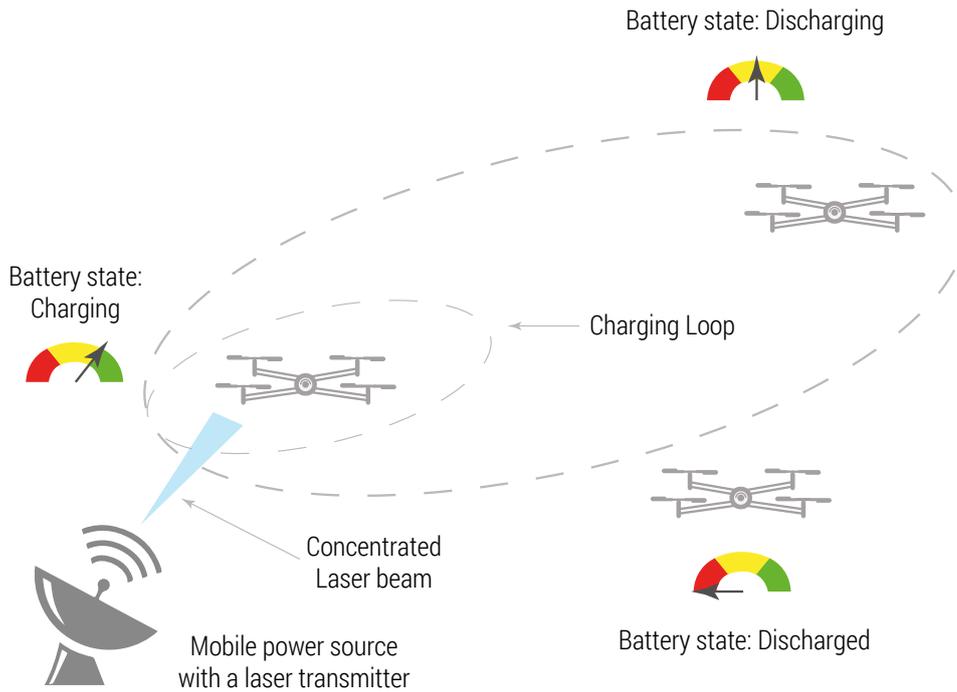


Рис. 2. Беспроводная лазерная подзарядка

Источник: [16]

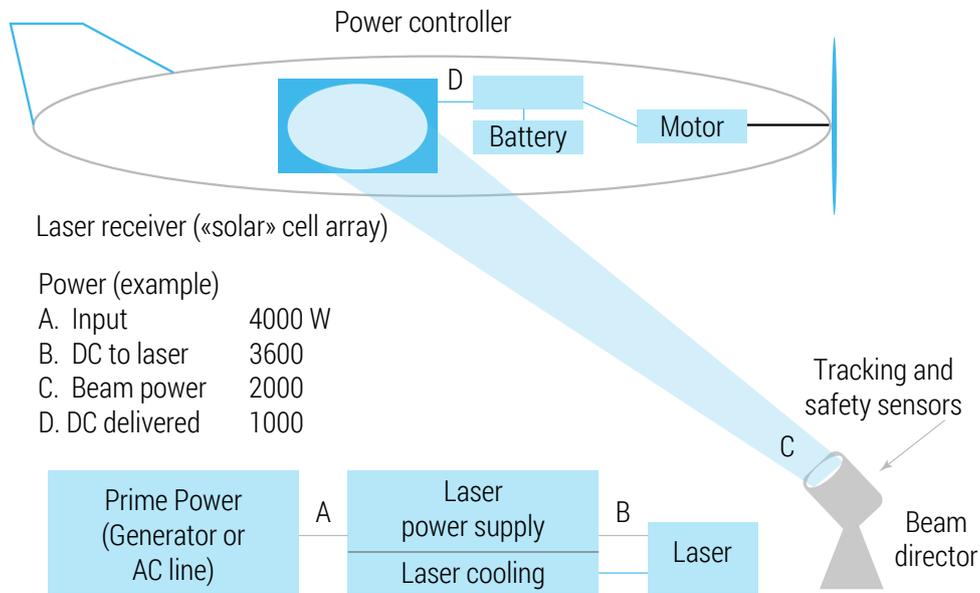


Рис. 3. Привязной БВС

Таким образом, при расположении зарядных станций вдоль траектории движения БВС появляется возможность обеспечения длительного времени полёта, но существуют определённые риски безопасности аппаратов при взлёте со станций и посадке на них. Эти риски устраняются при использовании беспроводной лазерной подзарядки (рис. 2), которая, однако, ограничивает расстояние и высоту полёта зоной вокруг радиуса распространения светового луча, передаваемого лазерным генератором на наземной станции [15].

Наконец, для решения задач на ограниченной местности полезны привязные БВС (рис. 3), преимущество которых состоит в неограниченной автономии и возможности увеличения полезной нагрузки

- сложность системы, приобретаемая вследствие необходимости установки на БВС преобразователей, контроллеров, сенсоров и иного оборудования;
- непостоянный характер выработки энергии от солнечной радиации;
- непригодность для малых БВС, во многом из-за потребности в максимизации размеров крыла для того, чтобы на них можно было расположить достаточное количество фотоэлектрических модулей.

Топливные элементы

Беспилотные воздушные суда, использующие водородные топливные элементы,

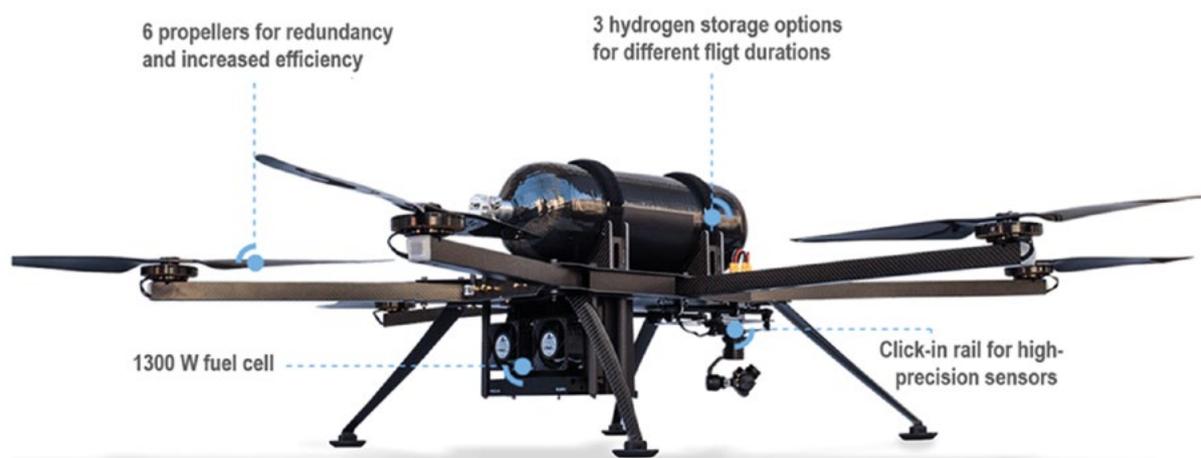


Рис. 4. БВС на топливных элементах

Источник: [22]

за счёт отсутствия необходимости установки источника или накопителя энергии непосредственно на аппарат [17].

Фотоэлектрические модули

Низкоуглеродной опцией для энергообеспечения БВС является установка модулей солнечной генерации непосредственно на аппараты так, чтобы энергия солнца могла обеспечивать полёт в течение периодов максимальной солнечной активности, а аккумуляторы с накопленной в эти периоды энергией – в отсутствие инсоляции [18]. Такая система увеличивает время полёта и в определённых условиях может даже сделать его неограниченным. Однако и она имеет такие ограничения, как [19]:

могут работать в течение нескольких часов вместо нескольких минут у аккумуляторных БВС (рис. 4). Топливные элементы превосходят батареи по удельной мощности, поэтому их следует рассматривать как предпочтительное решение для обеспечения большей «выносливости» при ограниченной массе [20]. Кроме того, процесс дозаправки осуществляется практически мгновенно, что снимает проблему простоя БВС, а энергопотери при передаче энергии сокращаются [21].

Тем не менее, при применении топливных элементов существует несколько негативных факторов, которые необходимо учитывать [23]:

- водород имеет плотность всего $0,089 \text{ кг/м}^3$ при стандартной температуре и давлении – соответствен-

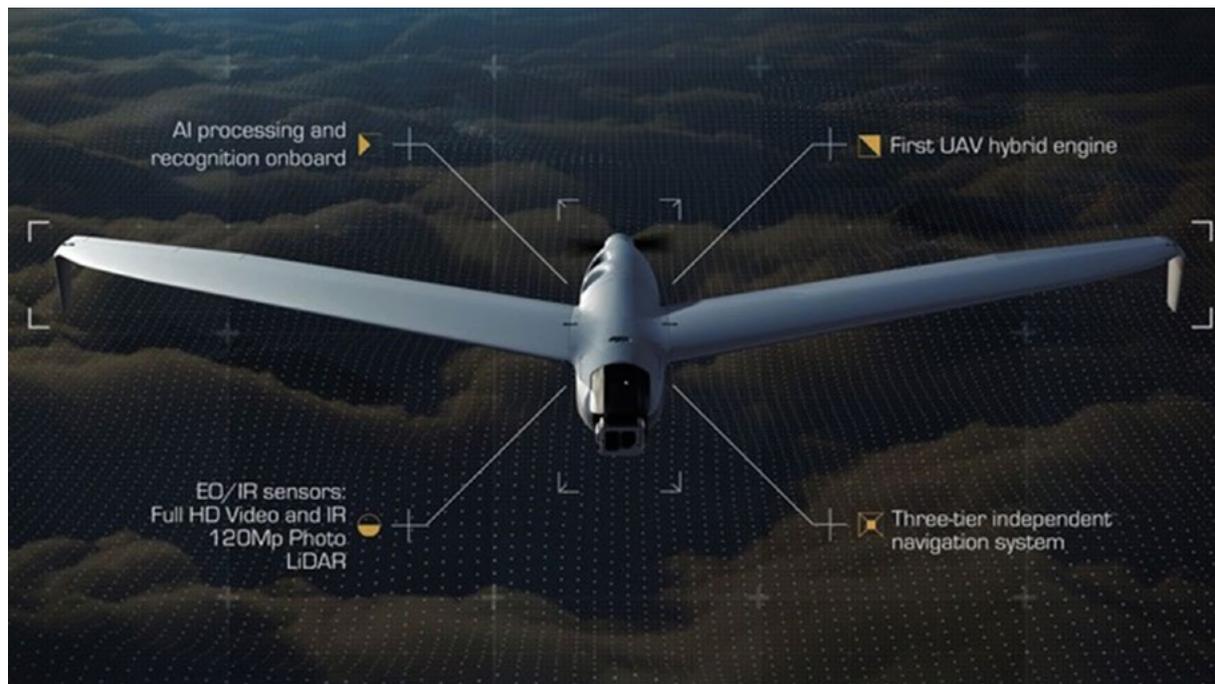


Рис. 5. Российский гибридный БВС ZALA 421–16E5G продемонстрировал полёт на 12 часов, расстояние более 1130 км

Источник: [25]

- но, чтобы БВС мог перевозить достаточное количество топлива, баки должны быть очень громоздкими;
- нестабильность напряжения при возникновении резких изменений в мощности;
- более низкая эффективность (60 %), чем у литий-ионных батарей (90 %);
- необходимость установки дополнительного оборудования, усложняющая систему.

Тенденции развития систем энергоснабжения БВС

Гибридизация выделяется как наиболее перспективная архитектура для осуществления энергопитания беспилотных воздушных судов. Такой подход позволит сочетать преимущества и характеристики различных источников энергии и уравновешивать их ограничения. Мощность должна быть оптимально распределена между источниками для достижения эффективного энергопотребления и обеспечения высокопроизводительной работы источников питания при максимально возможном продлении срока их службы.

Так, объединение топливного элемента с батареями для формирования гибридной

системы энергоснабжения представляется вариантом, который позволит двигательной установке БВС воспользоваться преимуществами обоих источников и сбалансировать их недостатки. Батарея в этом случае может использоваться в периоды пиковой нагрузки (взлёта и набора высоты), т. к. имеет более высокую эффективность и плотность мощности, а также не подвержена нестабильности напряжения. Топливный элемент, в свою очередь, может быть основным источником во время полёта и заправки [24]. Также батареи либо топливные элементы могут быть объединены с любой другой энергетической установкой. Тем не менее, гибридные

Газотурбинные двигатели, используемые в силовых установках летательных аппаратов, демонстрируют хорошие характеристики только в диапазоне более 100 л. с. и не подходят для малых БВС

Сейчас электродвигатели являются самым распространённым решением для малых БВС, источниками энергии для них являются электрические аккумуляторы, фотоэлектрические модули, топливные элементы

варианты электроснабжения БВС требуют установки систем управления энергопотреблением (контроллеры и инверторы), которые дополнительно увеличивают массу и сложность устройства.

Кроме того, на уровне теоретических и практических моделей и прототипов разрабатываются БВС с гибридными установками, включающими суперконденсаторы [26]. Суперконденсаторы имеют невысокую стоимость установки и обслуживания, более широкий разброс температур, при которых они могут функционировать, а также устойчивы к перегрузкам и не склонны к нестабильности напряжения в полёте [27].

Важную роль в развитии энергоснабжения БВС будут играть не только бортовые системы, но и зарядная инфраструктура для аккумуляторных дронов, являющихся в настоящее время наиболее распространённым их типом. Соответственно, возникает проблематика строительства такой инфраструктуры и её интеграции в электрические сети, которая вызовет дополнительную нагрузку на них [28]. В ряде случаев зарядные станции могут работать автономно при помощи ВИЭ (например, установленных на них фотоэлектрических систем) и накопителей энергии. Некоторые исследования предлагают объединение соответствующей инфраструктуры для БВС и электротранспорта с тем, чтобы беспилотники могли использовать в т. ч. существующие зарядные станции электромобилей [29]. Отдельной проблемой является пространственное расположение зарядных станций с учётом особенностей городской и сельской местности [30]. В случае зарядки методом подкачки возникает необходимость расположения зарядных станций вдоль траектории движения БВС, т. е. с достаточно высокой частотой распределения на местности. Это связано с тем, что аппараты могут запускаться по самым разным маршрутам. Поскольку

Проект БВС на водородных топливных элементах

Источник: uacrussia.livejournal.com



Гибридные варианты электроснабжения БВС требуют установки систем управления энергопотреблением (контроллеры и инверторы), которые дополнительно увеличивают массу и сложность устройства

размер таких станций компактен, их можно размещать на крышах зданий, столбах, светофорах и т. п. Здания рассматриваются как перспективные места и для расположения станций беспроводной лазерной подзарядки [31]. Альтернативными вариантами могут служить башни или вышки. Вследствие недостаточной развитости технологий автоматизации метода подкачки его использование в ряде случаев предполагает присутствие человека, а также может оказаться сложным и аварийно опасным. Беспроводные же варианты подзарядки считаются более безопасными как для самих БВС, так и для их операторов [32].

Наконец, по мере перехода к гибридным архитектурам БВС и появления территориально распределенной зарядной инфраструктуры повышается значимость управления энергопотреблением. Оно позволяет сочетать преимущества и характеристики различных источников питания и уравнивать их ограничения. Мощность должна быть оптимально распределена между источниками для достижения эффективного энергопотребления и обеспечения высокопроизводительной работы источников питания при максимально возможном продлении длительности их работы. Таким образом, должна быть внедрена система управления энергопотреблением для распределения мощности в режиме реального времени между доступными источниками с учетом таких ограничений, как эффективность, быстрая реакция, расход топлива, требуемая мощность и условия полета.

Ключевые технологические задачи в сфере энергетики для БВС в России

По результатам анализа тенденций в развитии энергетики БВС можно сделать несколько выводов.

Управление БВС

Источник: Stas_K / depositphotos.com



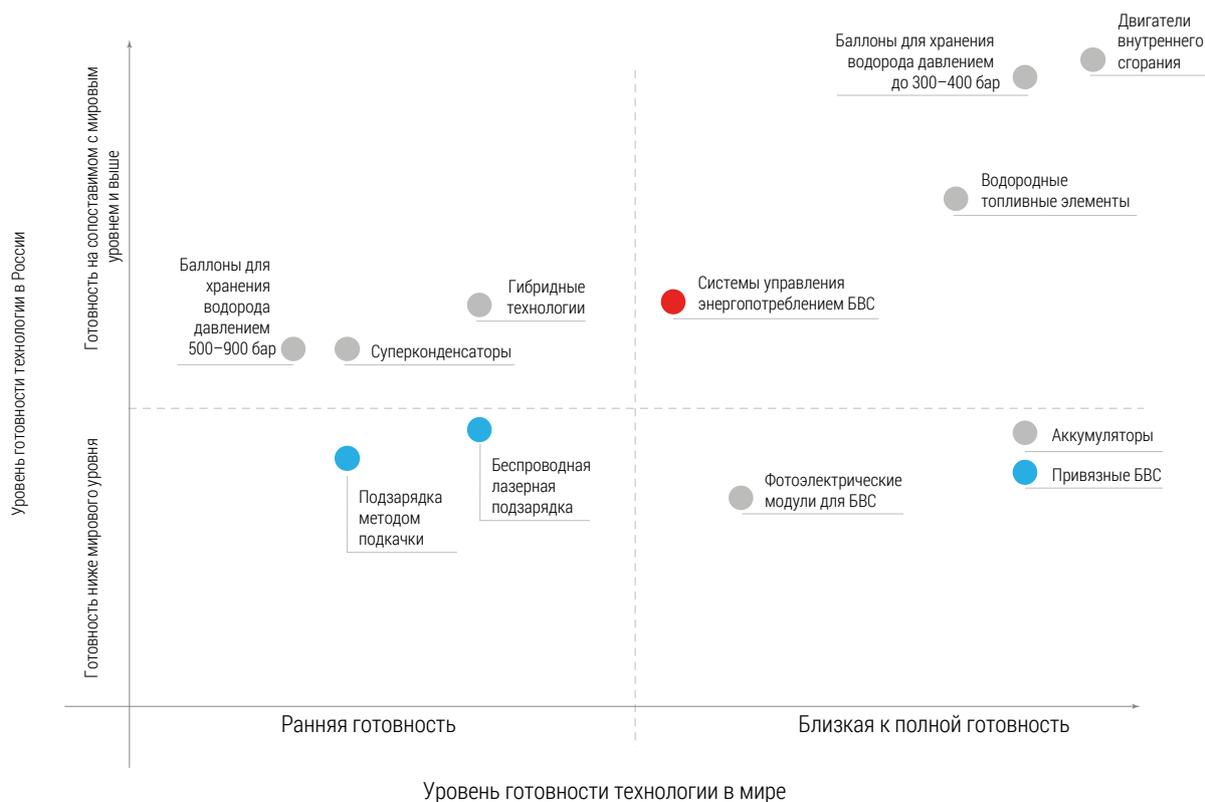


Рис. 6. Состояние развития технологий энергоснабжения БВС в мире и в России

Во-первых, для всех основных выделенных типов источников энергии существуют фронтальные технологические направления, недостаточный уровень развития которых будет сдерживать их переход к массовому использованию и коммерциализацию. Для БВС на водородных топливных элементах такой первостепенной задачей является повышение давления в баллонах для хранения водорода, что позволит увеличить его количество при сохранении объёма и, таким образом, продлить дальность полёта аппарата. С этой же целью в аккумуляторных БВС приоритетным направлением является увеличение плотности мощности. Параллельно должна развиваться и инфраструктура подзарядки, которая будет наиболее актуальна для микро- и малых БВС, неспособных переносить тяжёлые аккумуляторы. Наконец, для фотоэлектрических систем ключевой задачей представляется развитие в сторону гибридизации, в первую очередь с накопителями энергии, и совершенствование

интеллектуальных систем управления энергопотреблением, которые позволят наиболее эффективно использовать потенциал солнечной энергии с целью увеличения автономности БВС.

Во-вторых, число конкретных прикладных направлений, в которых БВС востребованы в российском гражданском сегменте, велико и ранжируется от мониторинга обширных и протяжённых инфраструктур

По мере перехода к гибридным архитектурам беспилотных воздушных средств и появления территориально распределенной зарядной инфраструктуры повышается значимость управления энергопотреблением

турных объектов (электрических сетей, строительных и нефтегазовых объектов) и сельскохозяйственных территорий до использования в науке (картографирование, изучение природных явлений, наблюдение за лесными массивами и ледниками) и коммерческих целях (логистика, реклама) [33]. Вне зависимости от цели применения БВС их экономическая целесообразность зависит от двух ключевых параметров – запаса хода и времени барражирования – которые, в свою очередь, определяются именно характеристиками источника энергии аппарата.

Рис. 6 демонстрирует состояние развития основных рассмотренных технологий энергоснабжения БВС в мире и в России. Очевидно, что некоторые технологии – например, водород и компрессионные баллоны – являются одними из наиболее перспективных для страны в технологической гонке на будущее, т. к. ещё достаточно слабо распространены по миру, но имеют большой накопленный отечественный задел.

Принимая во внимание данные факты, можно заключить, что в России с учётом имеющегося научно-технического и ресурсного потенциала перспективно разрабатывать и развивать следующие технологии в сфере энергоснабжения БВС:

- компрессия водорода и баллоны для его хранения, в т. ч. создание новых композитных материалов для них;
- аккумуляторы, в особенности литий-серные и постлитиевые, а также их развитие в части повышения плотности мощности;

- полная автоматизация и роботизация систем подзарядки малых БВС, которые станут одним из важных элементов сетевой инфраструктуры будущего;
- системы интеллектуального управления энергопотреблением БВС – поиск наиболее эффективных конфигураций различных источников и оптимизация процессов их работы в зависимости от режима полёта, условий окружающей среды и т. п.

В то время как эти технологии имеют наибольшие перспективы, развитие энергоснабжения БВС в России не может ограничиваться исключительно ими, поскольку обеспечение технологического суверенитета, в особенности в таком значимом направлении, должно носить более комплексный характер. В условиях ограниченного санкционными мерами доступа к зарубежным технологиям представляется приоритетным налаживание импортозамещения и развитие отечественных наукоёмких производств, в первую очередь по тем решениям энергоснабжения БВС, где отставание от мирового уровня значительно – аккумуляторным системам и методам их подзарядки, а также фотоэлектрическим модулям.

БВС – сравнительно новая, особенно для России, область практики со стремительно растущим спросом в гражданском и военном секторах, и многие вопросы энергоснабжения БВС и создания соответствующей инфраструктуры требуют детального исследования.

Использованные источники

1. *Unmanned Aerial Vehicle Market By Product (Small UAV, Tactical and Strategic UAV), By Point of Sale (Aftermarket, OEM), By Technology, By System, By Wing Type, By Application, By End-Use, and By Region Forecast to 2030.* – URL: <https://www.emergenresearch.com/industry-report/unmanned-aerial-vehicle-market>; *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market by Type, Application, and Weight: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2030.* – URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/unmanned-aerial-vehicle-market-A09059>; *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Research Report Information – Market Forecast Till 2030.* – URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/unmanned-aerial-vehicle-uav-market-806>; *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market – Global Industry Assessment and Forecast.* – URL: <https://www.vantagemarketresearch.com/industry-report/unmanned-aerial-vehicle-uav-market-2086>
2. H. Shakhathreh, A. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, N. S. Othman, A. Khreishah, M. Guizani, *Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges*, arXiv:1805.00881 [cs] (Apr. 2018). arXiv:1805.00881.
3. G. Potrino, N. Palmieri, V. Antonello, A. Serianni, *Drones support in precision agriculture for fighting against parasites*, in: 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR), IEEE, 2018, pp. 1-4 (2018).
4. R. Ke, Z. Li, S. Kim, J. Ash, Z. Cui, Y. Wang, *Real-time bidirectional traffic flow parameter estimation from aerial videos*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 18 (4) (2017) 890(901) (2017).
5. Z. Zhou, C. Zhang, C. Xu, F. Xiong, Y. Zhang, T. Umer, *Energy-efficient industrial internet of uavs for power line inspection in smart grid*, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14 (6) (2018) 2705(2714) (2018).
6. T. Villa, F. Gonzalez, B. Mijjevic, Z. Ristovski, L. Morawska, *An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future prospectives*, *Sensors* 16 (7) (2016) 1072 (2016).

7. Caizhi Zhang, Yuqi Qiu, Jiawei Chen, Yuehua Li, Zhitao Liu, Yang Liu, Jiujun Zhang, Chan Siew Hwa. A comprehensive review of electrochemical hybrid power supply systems and intelligent energy managements for unmanned aerial vehicles in public services // *Energy and AI Volume 9, August 2022, 100175.*
8. Примечание: количество и особенности классов и категорий могут значительно отличаться в разных научных исследованиях. Например, альтернативные классификации приводит НАТО (URL: https://www.japcc.org/wp-content/uploads/UAS_CONEMP.pdf), Н. Элмесе́йри и др. (URL: <http://dx.doi.org/10.3390/aerospace8120363>) и т. д.
9. Mohamed Nadir Boukoberine, Zhibin Zhou, Mohamed Benbouzid. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects // *Applied Energy Volume 255, 1 December 2019, 113823.*
10. Shehu, I.A., Mohammed, M., Sulaiman, S.H., Abdulkarim, A., Alhassan, A.B. (2021). A Review on Unmanned Aerial Vehicle Energy Sources and Management. In: Abawajy, J.H., Choo, K.K.R., Chiroma, H. (eds) *International Conference on Emerging Applications and Technologies for Industry 4.0 (EATI'2020)*. EATI 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 254. Springer, Cham.
11. Ibid.
12. Jacobsen, R., Ruhe, N., Dornback, N.: *Autonomous UAV Battery Swapping* (2018)
13. Liu, Z.-N., et al.: QUADO: an autonomous recharge system for quadcopter. In: *2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*. IEEE (2017).
14. Dhaval Joshi, Dipankar Deb, S. M Muyeen. Comprehensive Review on Electric Propulsion System of Unmanned Aerial Vehicles // *Front. Energy Res. Volume 10 – 2022 752012.*
15. Shehu, I.A., Mohammed, M., Sulaiman, S.H., Abdulkarim, A., Alhassan, A.B. (2021). A Review... *Op. cit.*
16. Xu, J., Zeng, Y., Zhang, R.: UAV-enabled wireless power transfer: trajectory design and energy optimization. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 17(8), 5092–5106 (2018).
17. Mohamed Nadir Boukoberine, Zhibin Zhou, Mohamed Benbouzid. A critical review... *Op. cit.*
18. Mohamed Nadir Boukoberine, Zhibin Zhou, Mohamed Benbouzid. A critical review... *Op. cit.*
19. Vega-Garita, V., et al.: Integrating a photovoltaic storage system in one device: a critical review. *Progr. Photovol. Res. Appl.* 27(4), 346–370 (2019).
20. Hakan Ucgun, Ugur Yuzgec, Metin Kesler, Cagri Cicekdemir. The Comparison of Energy Sources Used in Unmanned Air Vehicles // *International journal of scientific and technological research. Vol 5, No 6* (2019).
21. Gong, A., et al.: Analysis of a fuel-cell/battery/supercapacitor hybrid propulsion system for a UAV using a hardware-in-the-loop flight simulator. In: *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*. IEEE (2018).
22. Hakan Ucgun, Ugur Yuzgec, Metin Kesler, Cagri Cicekdemir. The Comparison... *Op. cit.*
23. Mohamed Nadir Boukoberine, Zhibin Zhou, Mohamed Benbouzid. A critical review... *Op. cit.*
24. Ibid.
25. J. J. Cooley, P. Lindahl, C. L. Zimmerman, M. Cornachione, G. Jordan, S. R. Shaw, S. B. Leeb, *Multiconverter system design for fuel cell bu_ering and diagnostics under uav load profiles*, *IEEE Transactions on Power Electronics* 29 (6) (2014) 3232{3244 (2014).
26. *The First Hybrid UAV ZALA Performed Flight Izhevsk – Yoshkar-Ola – Izhevsk.* – URL: <https://www.armadainternational.com/2021/09/the-first-hybrid-uav-zala-performed-flight-izhevsk-yoshkar-ola-izhevsk/>
27. Ashleigh Townsend, Immanuel N. Jiya, Christiaan Martinson, Dmitri Bessarabov, Rupert Gouws. A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements // *Heliyon* 6 (2020) e05285; H. Wang, Q. Wang, B. Hu, A review of developments in energy storage systems for hybrid excavators, *Automation in Construction* 80 (2017) 1–10 (2017).
28. Jiageng Ruan, Paul David Walker, Nong Zhang, Jinglai Wu. An investigation of hybrid energy storage system in multi-speed electric vehicle // *Energy Volume 140, Part 1, 1 December 2017, Pages 291-306.*
29. Boris Galkin, Jacek Kibiłda, and Luiz A. DaSilva. UAVs as Mobile Infrastructure: Addressing Battery
30. Lifetime. *arXiv:1807.00996.*
31. Yujie Qin, Mustafa A. Kishk. Performance Analysis of Charging Infrastructure Sharing in UAV and EV-involved Networks. *arXiv:2208.06782.*
32. Bacanlı, Salih Safa, Enas Elgeldawi, Begümhan Turgut, and Damla Turgut. 2022. UAV Charging Station Placement in Opportunistic Networks // *Drones* 6, no. 10: 293.
33. Raciti, Angelo & Rizzo, Santi & Susinni, Giovanni. (2018). Drone Charging Stations over the Buildings Based on a Wireless Power Transfer System // *Conference: Industrial and Commercial Power SystemsAt: Niagara Falls, ON, Canada.*
34. Bacanlı, Salih Safa, Enas Elgeldawi, Begümhan Turgut, and Damla Turgut. 2022. UAV Charging Station Placement... *Op. cit.*
35. Аникаева А. Д., Мартюшев Д. А. Оценка потенциала применения беспилотных летательных аппаратов в нефтегазовой отрасли // *Недропользование*. 2020. Т. 20. №4. С. 344–355; Вторый В. Ф., Вторый С. Ф. Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов // *АгроЭкоИнженерия*. 2017. №92. С. 158–165; Матюха С. В. Беспилотные авиационные системы в грузоперевозках // *Транспортное дело России*. 2022. №1. С. 141–143; Просвирина Н. В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // *Московский экономический журнал*. 2021. №10. С. 560–575.